

# Simulação de níveis de cheia no estuário do rio Douro, antes e após a construção dos molhes

## *River Douro estuary flood levels simulation, before and after the breakwater construction*

Isabel Iglesias<sup>1,\*</sup>, José Luís Pinho<sup>2</sup>, Stênio Venâncio<sup>2,3</sup>, Paulo Avilez-Valente<sup>1,4</sup>, Raquel Peixoto<sup>4</sup>, José Manuel Vieira<sup>2</sup>

\* Autor para a correspondência: iiglesias@ciimar.up.pt / isabel.iglesias.fdz@gmail.com

<sup>1</sup> Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), Universidade do Porto, Novo Edifício do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal.

<sup>2</sup> Centro do Território, Ambiente e Construção (CTAC), Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal.

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Dr. Raulino Borges Júnior 1250, Univerdecidade, 38064-200 Uberaba/MG, Brasil.

<sup>4</sup> Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto (FEUP), Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

**RESUMO:** A hidrodinâmica característica das zonas estuarinas apresenta padrões de circulação complexos, sendo as cheias um dos eventos extremos que interessa caracterizar de modo detalhado nestes ambientes. Neste contexto, na ótica da gestão ambiental sustentável e da minimização dos riscos associados à ocorrência de cheias em zonas ribeirinhas, os modelos numéricos, devidamente calibrados e validados, constituem uma ferramenta de análise de grande valia, permitindo realizar previsões com uma elevada fiabilidade. Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos com dois modelos numéricos aplicados ao estudo das cheias no estuário do rio Douro. Pretende-se criar um sistema de previsão e alerta de cheias que permita também identificar as áreas que poderão ser inundadas. Foram realizadas várias simulações, que incluíram diversos cenários, representando o efeito da atual configuração do sistema restinga e molhes na elevação da superfície livre da água. Os cenários simulados pretendem avaliar os riscos associados à ocorrência de cheias semelhantes às cheias históricas. Observou-se que, caso se verifiquem cheias com valores idênticos de caudal às que ocorreram no passado, serão inevitáveis inundações eventualmente mais gravosas, tendo-se identificado as áreas que poderão vir a ser afetadas. Os resultados obtidos poderão servir, desde já, para a definição de medidas que permitam diminuir eventuais perdas económicas e danos em infraestruturas.

**Palavras-chave:** Cheias; Hidrodinâmica; Modelos numéricos; Estuário; rio Douro.

**ABSTRACT:** Estuarine hydrodynamics present complex circulation patterns being floods one of the extreme events that needs correct characterization in these environments. In this context, from the point of view of sustainable environmental management and the minimization of associated flood risks in the estuarine banks, numerical models represent highly valuable analysis tools, allowing to develop reliable forecasts. This work presents the results of two numerical models implemented to simulate floods in the river Douro estuary. It is intended to use these models to design and implement an early warning and flood forecast system with capabilities to identify areas that could potentially be inundated. Simulations included several scenarios representing the effect of the current configuration of the sand spit and breakwaters, located at the estuary mouth, in water elevations within the estuary. It was observed that, for floods similar to those that occurred in the past, more serious effects can be expected in the estuarine margins. Results from this study can be used to define adequate solutions to minimize potential economic losses and damage of infrastructures.

**Keywords:** Floods; Hydrodynamics; Numerical models; Estuary; river Douro.

## 1. INTRODUÇÃO

As margens dos estuários são zonas muito atrativas para ocupação antrópica, resultando em áreas densamente urbanizadas devido ao elevado número de serviços ecossistémicos oferecidos, nomeadamente turismo, pesca, paisagem, transporte, atividades náuticas ou portuárias, entre outras. Tendo em consideração o impacto que as construções antropogénicas, como quebra-mares portuários, diques e estruturas de defesa costeira têm sobre as áreas estuarinas, é necessário conhecer a dinâmica destes sistemas influenciada por aquelas infraestruturas hidráulicas. Quando necessário, deverão ser definidas medidas de adaptação que permitam aumentar a resiliência destes sistemas a eventos extremos.

Um dos problemas mais relevantes para as margens estuarinas são as inundações urbanas, condicionadas diretamente pelas descargas fluviais e pela oscilação do nível do mar, mas também pela dinâmica de condicionantes naturais, como a evolução morfológica dos fundos, agravadas por eventuais ações antropogénicas. As cheias e inundações têm assolado o equilíbrio das envolventes urbanas de estuários, com impactos na conjuntura económica, social e ambiental. Sabendo-se que uma considerável parcela da população mundial vive em zonas urbanas adjacentes a estuários, onde a ocorrência das inundações é relativamente frequente, torna-se fulcral a produção de informação que permita a mitigação e adaptação das áreas vulneráveis à inundação e a sua consideração nos planos municipais de ordenamento do território.

Em Portugal, o estuário do rio Douro apresenta-se como um importante exemplo da ocorrência de inundações, apresentando vulnerabilidades devido aos aglomerados urbanos implantados nas zonas ribeirinhas. Este estuário é uma das 22 zonas críticas em Portugal Continental contempladas no Plano de Gestão dos Riscos de Inundações (APA 2016) pelo histórico das grandes cheias. Durante a ocorrência destas cheias, como por exemplo, as ocorridas em 1909 e 1962, antes da construção das barragens de montante, alguns dos efeitos incluíram perdas de vidas, problemas de navegação, e grandes prejuízos económicos (Bastos *et al.* 2012). É, portanto, fulcral o seu estudo devido à importância que apresenta para a minimização dos efeitos associados a estes fenómenos extremos, enquadrado nas orientações e prioridades de atuação da Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (RCM 2010), mas também no âmbito de várias estratégias nacionais e internacionais como a Estratégia Marítima Nacional

Portuguesa, o Programa H2020 ou a Estratégia de Especialização Inteligente (RIS3). Estas estratégias incluem como objetivos principais o estudo dos efeitos e consequências nos ambientes marinhos e no ciclo da água das alterações climáticas e dos eventos extremos.

Entretanto, a gestão atual deste processo ainda assume caráter não trivial, pelas próprias características das albufeiras portuguesas (fio de água) que dependem do controlo feito em território espanhol, pelo conhecimento da dinâmica marítima em cenário de mudanças climáticas, pela morfodinâmica do estuário, e pela incapacidade de antever cenários baseados no conhecimento de todas as variáveis envolvidas, ora pela escassez ou ausência de dados.

A modelação numérica computacional tem sido uma ferramenta generalizadamente aplicada em todo o mundo em estudos completos e detalhados de cheias e inundações em estuários (Araújo *et al.* 2013; Horritt e Bates 2002; Pinho *et al.* 2010). Os modelos numéricos permitem a representação dos processos hidrodinâmicos, dos padrões de circulação e dos processos de erosão/deposição, sendo uma importante ferramenta para avaliar e prever os efeitos de intervenções antropogénicas, eventos extremos ou alterações climáticas, apoiando uma gestão eficaz e integrada e promovendo a segurança das populações e a sustentabilidade dos ecossistemas e dos seus serviços. Uma vez calibrados e validados, estes modelos podem ser aplicados para identificar as áreas de risco perante a ocorrência de eventos extremos, protegendo as populações, os recursos naturais e as atividades económicas e promovendo a gestão, informação e apoio à decisão na gestão dos sistemas estuarinos. Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos com dois modelos numéricos desenvolvidos para o estuário do rio Douro, com o objetivo de identificar as áreas estuarinas vulneráveis à ocorrência de inundações, tendo por base as características das cheias históricas e da atual configuração da embocadura do estuário. Os modelos foram implementados em duas ferramentas de modelação distintas, *Delft3D* (Delft3D-FLOW 2011) e *OpenTELEMAC-MASCARET* (Telemac-2D 2017), o que permite aumentar a confiança nos resultados.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O rio Douro é um dos principais rios da Península Ibérica, escoando para o Oceano Atlântico através de um estuário estreito e altamente dinâmico (9,8 km<sup>2</sup> de área, 21,6 km de extensão), limitado por



duas cidades: Porto e Vila Nova de Gaia (Figura 1). A montante, o estuário está limitado pela barragem de Crestuma-Lever. Na embocadura encontra-se a restinga, um banco arenoso e extremadamente dinâmico formado pela deposição de sedimentos

provenientes da deriva litoral e/ou do rio. Junto à restinga encontra-se a Baía de São Paio onde fica localizada a Reserva Natural Local do Estuário do Douro cujos objetivos são a preservação da paisagem e a proteção do habitat das aves.



**Figura 1.** Principais estruturas do estuário do rio Douro e pontos de amostragem: a verde locais de medição da elevação da superfície livre, a vermelho locais de medição das correntes e a azul os locais com marcas de níveis atingidos durante cheias históricas consideradas. (Fonte: Google Earth).

A batimetria deste estuário tem uma distribuição irregular (Araújo *et al.* 2013), com profundidades entre 0 e 10 m (referente ao nível médio da água do mar, NMM). Existem locais com 28 m (NMM) de profundidade associados a secções do estuário mais estreitas, curvas exteriores e locais de extração de inertes (Portela 2008). O transporte de sedimentos é condicionado pelos processos fluviais, sendo este estuário a principal fonte de sedimentos finos na parte norte da plataforma continental portuguesa (Araújo *et al.* 2002). Contudo, o sistema de barragens que controla as descargas fluviais tem vindo a reduzir a quantidade de sedimento que chega à zona estuarina e, portanto, também a que chega à plataforma costeira (Portela 2008).

A temperatura média diária das massas de água estuarinas varia entre 7 °C no inverno e 22 °C no verão (Magalhães *et al.* 2002). As marés são semidiurnas, apresentando um período de maré de 12.4 h. É um estuário mesotidal, em que a amplitude da maré varia entre 2 e 4 m (Vieira e Bordalo 2000). A intrusão salina depende do caudal do rio e da amplitude da maré e só atinge a barragem de Crestuma-Lever em condições de caudal exceccionalmente baixo (Pinho *et al.* 2010). O caudal de água doce, controlado por esta barragem, é altamente dependente da produção de energia hidroelétrica, e pode atingir um valor superior a 13000 m<sup>3</sup>/s (Azevedo *et al.* 2010). Este caudal apresenta um comportamento normal consentâneo com o clima de bacias à sua latitude, com valores mais altos durante o inverno e mais baixos durante o verão, dependendo do ciclo anual de precipitação na região (Gómez-Gesteira *et al.* 2011). Contudo, a sua variabilidade interanual é elevada, com diferenças significativas entre anos secos e húmidos. Em anos húmidos pode apresentar regimes torrenciais com correntes e cheias intensas (Portela 2008).

A dinâmica deste estuário é forçada fundamentalmente pelos fluxos de água que são turbinados na barragem de Crestuma-Lever. Para valores de caudal superiores a 800 m<sup>3</sup>/s, as massas de água estuarina são de origem fluvial, pelo que a intrusão de água salina durante a ocorrência de cheias é inexistente. Abaixo daquele valor, a água oceânica entra no estuário em forma de cunha salina (Azevedo *et al.* 2008). Esta variabilidade implica que o tempo de residência da água doce no estuário possa variar de 8 h a mais de 2 semanas (Vieira e Bordalo 2000).

O estuário do rio Douro tem vindo a sofrer intensas modificações antropogénicas. Para além da construção de marinas, cais e muros, dragagem de sedimentos e artificialização das margens, foram

construídos no ano de 2008 os quebra-mares na foz do estuário (Figura 1a) que modificaram os padrões de circulação e erosão/acreção desta área. Os objetivos principais da construção do molhe norte e do quebra-mar destacado foram diminuir o assoreamento do canal de navegação, impedir a migração da restinga (Figura 1a) para o interior do estuário e reduzir a propagação das ondas no interior da área estuarina protegendo a navegação no interior do estuário. No entanto, estes molhes têm vindo a interferir com os padrões hidrodinâmicos e de sedimentação, produzindo um assoreamento da Baía de São Paio e um aumento na área e volume da restinga (Bastos *et al.* 2012). Antes da construção dos molhes, a restinga era completamente ou parcialmente destruída para caudais da ordem dos 10000 m<sup>3</sup>/s, aliviando a subida do nível da cheia no interior do estuário. A atual configuração da restinga diminui as possibilidades de galgamento ou rutura durante as cheias, contribuindo para o aumento do nível da água durante a ocorrência de cheias e, portanto, apresentando-se como um fator que poderá agravar as perdas económicas e os danos em infraestruturas.

Considerando que este estuário tem sofrido importantes cheias devido às características do seu vale extremamente encaixado e ao caudal elevado, com a consequente inundação das zonas ribeirinhas, torna-se importante conhecer o comportamento da hidrodinâmica no estuário com a atual configuração da embocadura, considerando a ocorrência de cheias idênticas às que ocorreram no período anterior ao da construção das obras de defesa.

### 3. MODELOS NUMÉRICOS

Para a consecução deste trabalho foram selecionados dois programas de modelação hidrodinâmica, com base na sua capacidade de simular os padrões hidrodinâmicos das áreas estuarinas e a elevação da superfície livre da água durante os eventos de cheias. As versões 2DH, i.e. duas dimensões horizontais, do *OpenTELEMAC-MASCARET* e do *Delf3D* resolvem as equações de águas pouco profundas integradas segundo a direção vertical, tendo em consideração efeitos como o atrito com o fundo, a turbulência ou a natureza lenta ou rápida do escoamento, entre outros.

O *Telemac2D* (Telemac-2D 2017) é um módulo do *OpenTELEMAC-MASCARET* (<http://www.opentelemac.org/>) com uma formulação 2DH onde se considera a coluna de água bem misturada e a velocidade segundo a direção vertical negligenciável. O fundo e a superfície livre são



considerados impermeáveis. Para a discretização e integração numérica, utiliza-se um esquema numérico baseado no método dos elementos finitos, utilizando malhas não estruturadas de elementos finitos triangulares.

O *Delft3D-FLOW* (Delft3D-FLOW 2011) é o módulo de base principal do *Delft3D* (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>), que realiza a simulação hidrodinâmica e de transporte com formulações da hidrodinâmica e simplificações 2DH idênticas às consideradas no *Telemac2D*, mas com técnicas numéricas de discretização espacial baseadas no método das diferenças finitas.

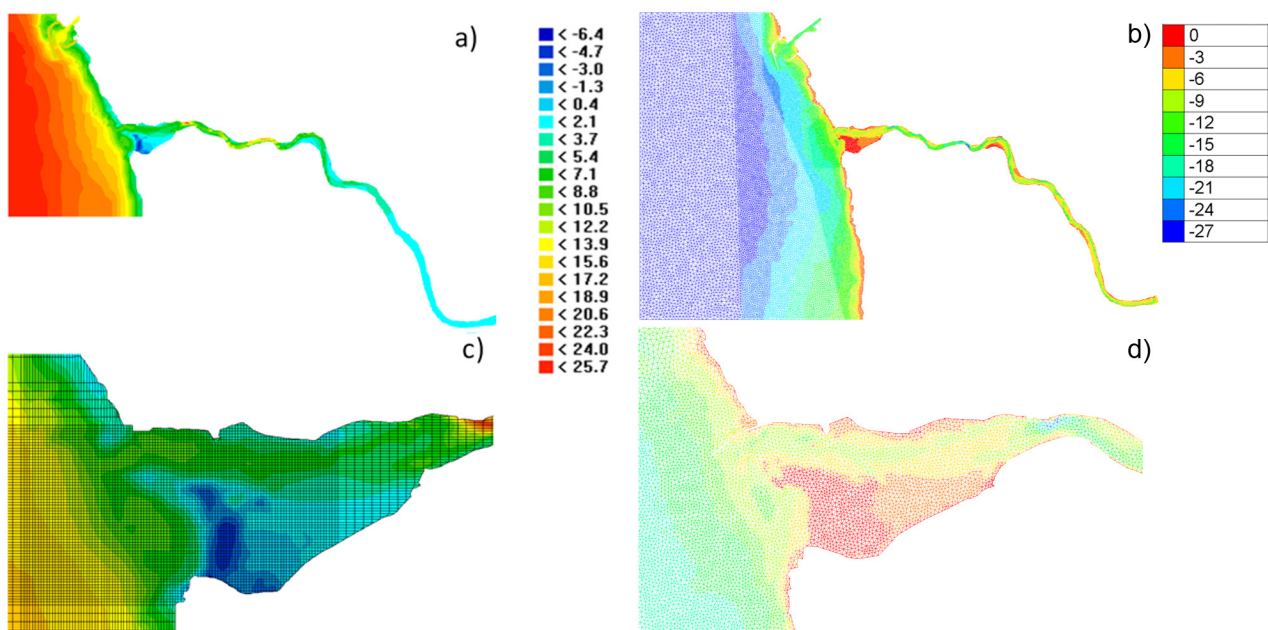
Para cada um dos modelos considerados foram construídas duas malhas computacionais abrangendo um domínio que se estende desde a barragem de Crestuma-Lever até ao Oceano Atlântico, incluindo a área costeira adjacente e o Porto de Leixões (Figura 2). A diferença entre as duas malhas reside na representação da embocadura do estuário antes e após a construção dos quebra-mares. Foram utilizados dados de batimetrias do *GEBCO* (Becker *et al.* 2009) e do Instituto Hidrográfico (IH), com datas de 1998 e de 2002, bem como levantamentos topográficos da restinga realizados pelo CIIMAR-UPorto (Bastos *et al.* 2012).

A maré foi introduzida no *OpenTELEMAC-MASCARET* utilizando os dados do *TPXO.2* (Egbert *et al.* 1994) e no *Delft3D* através dos principais constituintes harmónicos obtidos a partir de séries históricas da elevação de maré. Os caudais fluviais foram

fornecidos pela EDP e, para os registos históricos, foram usados valores anteriormente publicados (Pardé 1966; Rodrigues *et al.* 2003). A temperatura e a salinidade das fronteiras oceânica e do rio foram incluídas utilizando valores extraídos de trabalhos anteriores (Azevedo *et al.* 2006; deCastro *et al.* 2008; Pinto 2007) ficando fixadas em 35,8 PSU e 17 °C para a fronteira oceânica e 0 PSU e 8 °C para a fronteira fluvial.

#### 4. VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO

Os dados de campo usados para a validação e calibração dos modelos numéricos foram disponibilizados pelo IH e referem-se a dados de batimetria e às estações de monitorização de Cantareira e Cais da Estiva (marégrafo), assim como a dois pontos (A e B) de medição de velocidades (Figura 1a e b). O levantamento batimétrico selecionado para a construção das malhas tem data de 1998, mas as medições de elevação e de corrente foram realizados na Campanha Hidromorfológica para o Estudo da Barra do Douro (IH 1995) que decorreu entre Setembro e Outubro de 1994. Estes dados permitiram calibrar e validar os modelos com dados de elevação da superfície livre e de velocidade da corrente em condições normais, para a situação anterior à construção dos molhes. Com este intuito, foram feitas simulações de 24 dias de duração entre o dia 11 de Setembro de 1994 e o dia 4 de Outubro do mesmo ano.

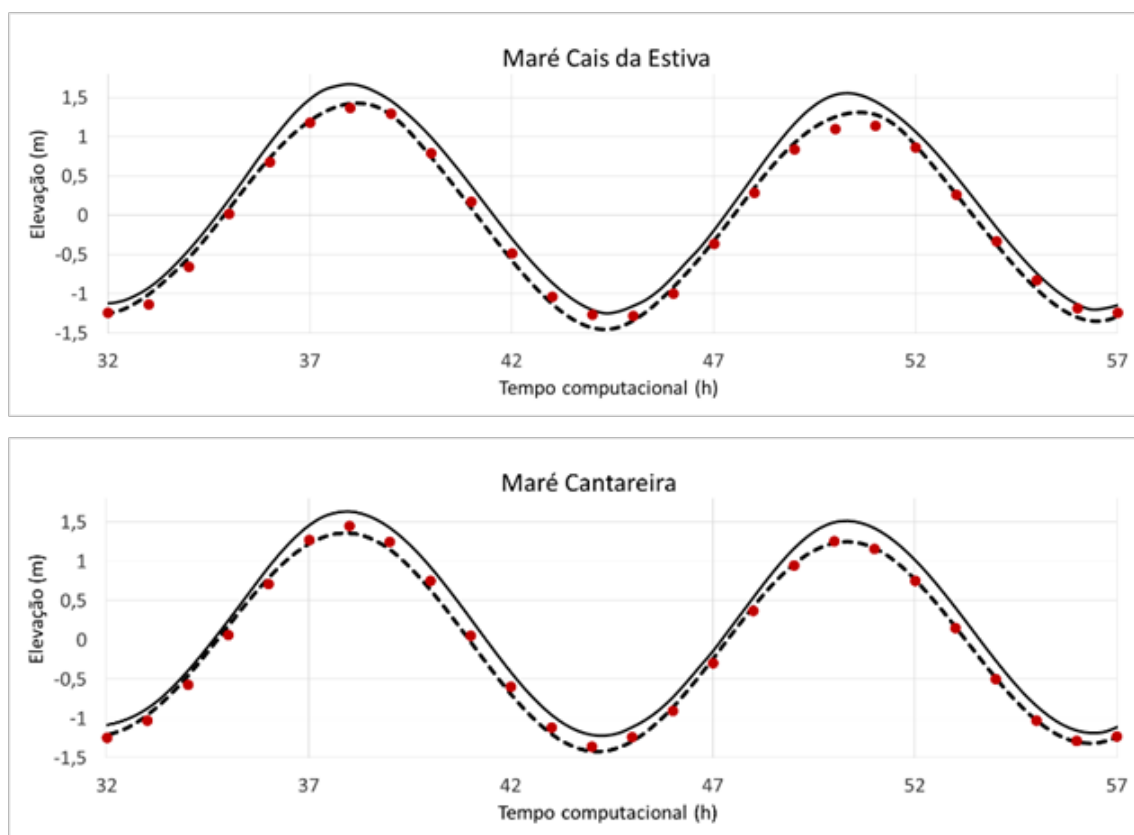


**Figura 2.** Malhas computacionais dos modelos do estuário do rio Douro. A escala de cores representa a batimetria (m). a) Batimetria do *Delft3D* antes da construção dos quebra-mares; b) Batimetria do *OpenTELEMAC-MASCARET* após a construção dos quebra-mares; c) Detalhe de a); d) Detalhe de b).

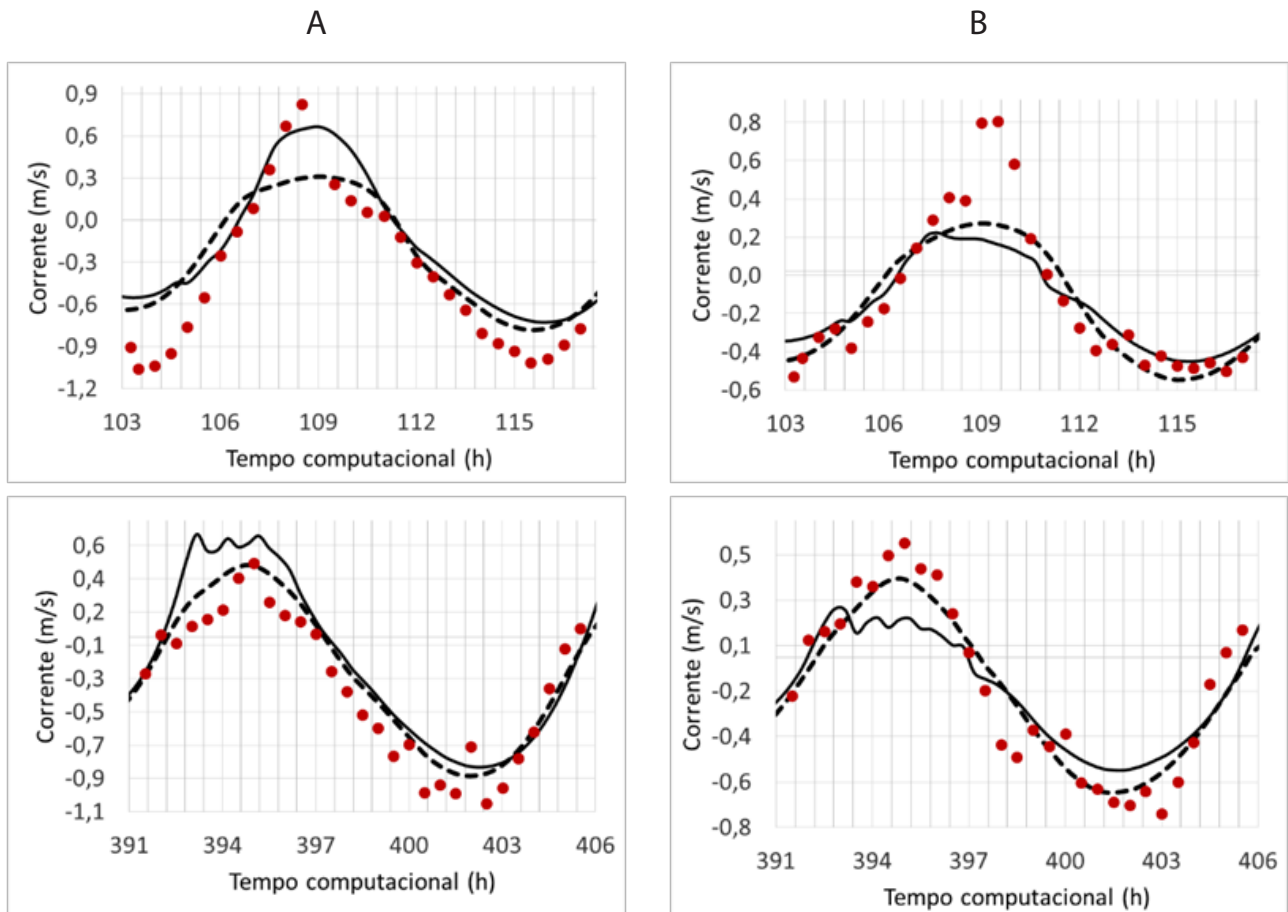
Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados desta análise para os períodos em que foram registados os dados de campo, evidenciando o bom desempenho dos modelos na representação da elevação da superfície livre da água (Figura 3) e na simulação da componente horizontal (média na coluna de água) da velocidade da corrente (Figura 4). Os dados de elevação da superfície livre são da mesma ordem de grandeza nos pontos de controlo de Cantareira e Cais da Estiva, o que mostra que, para o caudal fluvial considerado, que não excedeu  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ , a hidrodinâmica do estuário é controlada pela maré.

As diferenças verificadas entre os valores das velocidades das correntes medidos e os valores

simulados pelos modelos (Figura 4) podem estar relacionadas com a configuração da restinga e a batimetria considerada nas simulações (de 1998) e a configuração real à data da campanha de amostragem (1994). Por outro lado, as diferenças encontradas entre os resultados dos modelos, que utilizam os mesmos dados de base, poderão ser explicáveis, essencialmente, pelas diferentes técnicas de discretização espacial utilizadas, e eventualmente por alguma diferença no tratamento das zonas inter-marés. Contudo, os valores obtidos estão em concordância com os apresentados por Portela (2008) para as mesmas estações de monitorização.



**Figura 3.** Resultados da validação dos modelos: elevação da superfície livre em Cais da Estiva e Cantareira. Pontos vermelhos: campanha; linha contínua: *OpenTELEMAC-MASCARET*; linha descontinua: *Delft3D*.



**Figura 4.** Resultados da validação dos modelos: velocidade média da corrente para os pontos A e B. Pontos vermelhos: campanha; linha contínua: *OpenTELEMAC-MASCARET*; linha descontinua: *Delft3D*.

## 5. SIMULAÇÕES DE CHEIAS

Foram consideradas simulações de cheias históricas correspondentes aos eventos de 1962 e de 2001, onde se verificaram caudais da ordem de 17000 m<sup>3</sup>/s e 9812 m<sup>3</sup>/s respetivamente (dados de caudais procedentes de Pardé 1966 e da EDP). Os níveis de água obtidos pelos modelos foram comparados

com as marcas de cheias materializadas nas edificações das caves Sandeman, móveis Pina, bar Falcão e com os dados procedentes do trabalho de Oliveira (1973) referentes à ponte Luiz I (Tabela 1, Figura 1b). Estas marcas serviram também para validar e calibrar o modelo para as situações de cheia.

**Tabela 1.** Comparação dos níveis de elevação da superfície livre medidos e simulados em diversos pontos do estuário, na configuração sem quebra-mares (SQ).

Cheia	Localização	Nível observado (m)	Nível simulado (m)			
			<i>OpenTELEMAC-MASCARET</i>		<i>Delft3D</i>	
			SQ	Diferença	SQ	Diferença
1962	Sandeman	8,29	8,35	0,06	8,23	-0,06
	Falcão	8,32	8,39	0,07	8,05	-0,27
	Pina	8,18	8,57	0,39	8,13	0,05
	Ponte Luiz I	8,00	8,07	0,07	8,01	0,01
2001	Sandeman	4,99	5,34	0,35	5,16	0,17

As simulações das cheias históricas foram realizadas com as duas malhas construídas (representativas das situações anterior e posterior à construção dos molhes, Figura 2) de forma a investigar o efeito que uma cheia histórica teria, na atual configuração do estuário do rio Douro, devido à evolução da restinga e à construção dos quebra-mares. Os resultados obtidos para a elevação da superfície na simulação das cheias são apresentados nas Tabelas 1 e 2 e também na Figura 5.

Os resultados incluídos na Tabela 1 mostram que os níveis obtidos com ambos os modelos estão próximos daqueles que foram registados, com diferenças entre 0,06 e 0,39 m para o modelo construído com o programa *OpenTELEMAC-MASCARET* e entre -0,27 e 0,17 m com o modelo construído com o programa *Delft3D*.

Se comparamos os níveis antes e após a construção dos molhes nas zonas que habitualmente são inundáveis (Sandeman, Falcão, Pina e Ponte Luiz I; ver Tabela 2) observamos que o *OpenTELEMAC-MASCARET* prevê um aumento da elevação da superfície livre de aproximadamente 1,24 m para a cheia de 1962 e de 0,45 m para a cheia do 2001, e que o *Delft3D* prevê aumentos de 0,64 e 0,23 m, respetivamente.

Um perfil da elevação da superfície livre entre a restinga e a ponte Luiz I (ver Figura 5) mostra que, para as duas cheias analisadas (caudais superiores a 9800 m<sup>3</sup>/s), o efeito da variação da elevação do nível do mar não se faz sentir para o interior do estuário para montante de uma secção próxima da Ponte da Arrábida, sendo os níveis de cheia para montante condicionados unicamente pelo caudal fluvial. Para além disso, o efeito da construção dos molhes produz um aumento da elevação da superfície livre da água, assumindo que a configuração da restinga se mantém inalterada durante a cheia. O gradiente máximo é observado no limite oceânico da região estuarina, onde se localizam os quebra-mares e

a restinga. Este gradiente poderá estar associado à formação de um ressalto com passagem de regime rápido a lento (Nahon et al. 2011), mas as interpolações batimétricas consideradas e os métodos numéricos para resolução de problemas podem influenciar os níveis de água e padrões de ressalto obtidos por ambos os modelos. Outra possível causa para a formação deste gradiente seria à contração que as estruturas da embocadura induzem na secção transversal do fluxo de cheia. O nível da água atingido neste local varia entre 4,4 m e 7,2 m dependendo do valor do caudal de cheia. Apresentando as margens estuarinas uma elevação entre 3 e 5 m acima do nível médio do mar serão inevitáveis inundações eventualmente mais gravosas, caso se verifiquem cheias com caudais semelhantes aos que ocorreram no passado.

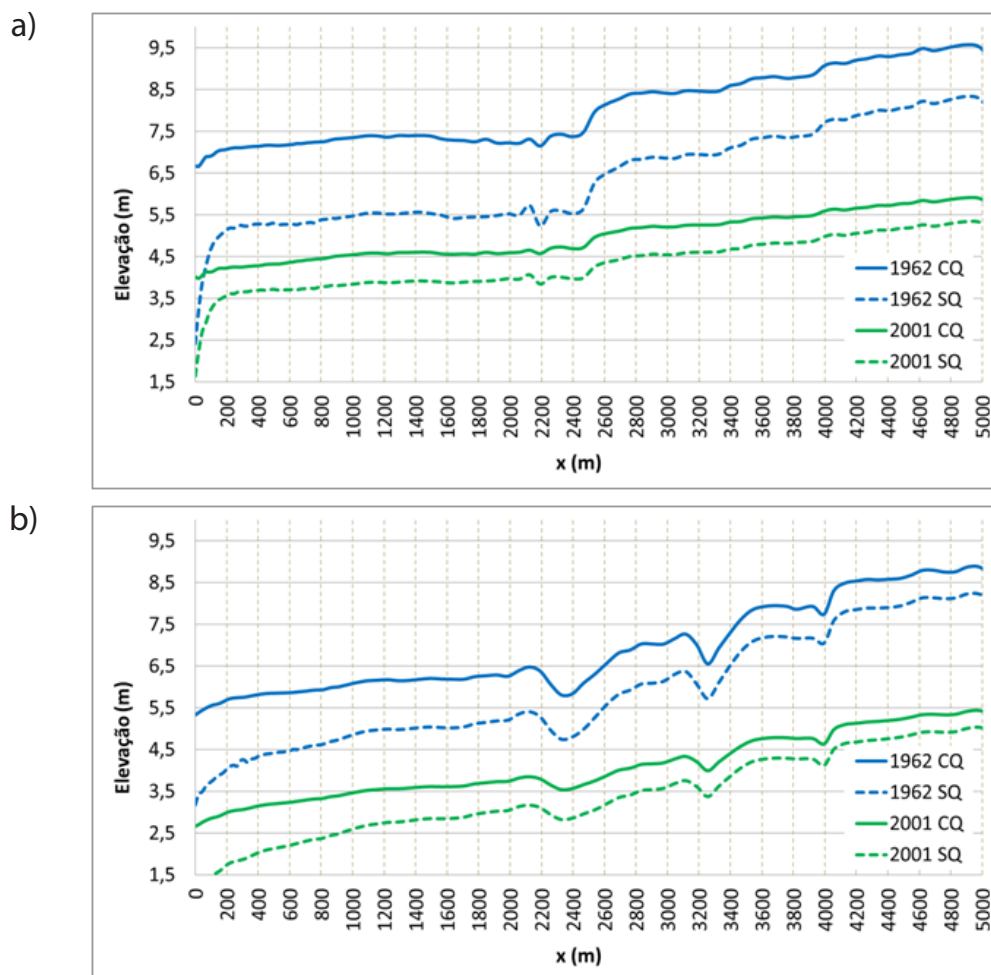
## 6. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido evidencia a importância do desenvolvimento de técnicas baseadas em ferramentas de modelação hidrodinâmica que permitam prever o comportamento das áreas estuarinas em caso de ocorrência de cheias. Deste modo é possível caracterizar os riscos decorrentes da ocupação urbana e contribui-se para uma gestão mais eficaz durante a ocorrência deste tipo de evento através do conhecimento antecipado de situações que possam afetar as populações ribeirinhas. Os resultados permitem a adoção de medidas de defesa ou adaptação que procurem mitigar os efeitos das cheias de forma a diminuir a danos em infraestruturas, perdas económicas e, sobretudo, evitar a perda de vidas humanas. Os modelos hidrodinâmicos implementados para o estuário do rio Douro apresentaram robustez, confirmando a sua capacidade de reproduzir os níveis registados com elevada aproximação. As diferenças observadas na validação podem estar relacionadas com os dados de batimetria

Tabela 2. Comparação dos níveis de elevação da superfície livre em diversos pontos do estuário, para as simulações sem quebra-mares (SQ) e com quebra-mares (CQ).

Cheia	Localização	Nível (m)			
		<i>OpenTELEMAC-MASCARET</i>		<i>Delft3D</i>	
		Simulação CQ	S.CQ – S.SQ	Simulação CQ	S.CQ – S.SQ
1962	Sandeman	9,57	1,22	8,87	0,64
	Falcão	9,62	1,23	8,66	0,61
	Pina	9,79	1,22	8,77	0,64
	Ponte Luiz I	9,31	1,24	8,65	0,64
2001	Sandeman	5,79	0,45	5,39	0,23





**Figura 5.** Perfil de elevação da superfície livre entre a foz do estuário (0 m) e a ponte Luiz I (5000 m), para as simulações sem quebra-mares (SQ) e com quebra-mares (CQ). a) *OpenTELEMAC-MASCARET*; b) *Delft3D*.

incluídos na geração das malhas computacionais. Os resultados obtidos demonstraram que a hidrodinâmica do estuário é controlada pela maré ou pela influência fluvial dependendo do caudal, sendo que, em condições de cheia, o efeito da elevação do mar, relacionado com as marés, não se faz sentir para montante de uma secção próxima da Ponte da Arrábida. Foi claramente representada a influência da atual configuração do sistema restinga/molhes nos níveis de cheias atingidos durante a ocorrência de cheias com magnitude idêntica à de cheias históricas. Os valores obtidos para as configurações antes e após a construção dos quebra-mares revelam um aumento da elevação da superfície livre de entre 0,64 e 1,24 m para uma cheia similar à de 1962 e de entre 0,23 e 0,45 m para uma similar à de 2001, o que implicaria níveis máximos de elevação da superfície livre na zona estuarina entre 8,75 e 9,31 m para um caudal de cheia como o verificado em 1962, e de entre

5,39 e 5,79 m para o caudal de cheia de 2001. Estes resultados permitirão avaliar os riscos associados à ocorrência de eventos extremos de cheia que implicam inundações mais graves devido à atual configuração desta área estuarina, agravando as perdas económicas e os danos em infraestruturas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela linha de investigação ECOSERVICES, integrada no Projeto Estruturado de I&D&I INNOVMAR—Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (NORTE-01-0145-FEDER-000035), cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), e pelo CNPq através de uma bolsa de pós doutoramento concedida ao segundo autor (200016 / 2014-8).

## REFERÊNCIAS

- APA (2016): Plano de Gestão dos Riscos de Inundações: Região Hidrográfica 3 – Douro. Agência Portuguesa do Ambiente, Lisboa.
- Araújo, MF, J-M Jouanneau, P Valério, T Barbosa, A Gouveia, O Weber, A Oliveira, A Rodrigues and JMA Dias (2002): Geochemical tracers of northern Portuguese estuarine sediments on the shelf. *Progress in Oceanography* 52: 277–297.
- Araújo, MAVC, A Mazzolari, A Trigo-Teixeira (2013): An object oriented mesh generator: application to flooding in the Douro estuary. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 65: 642–647.
- Azevedo, IC, PM Duarte, AA Bordalo (2006): Pelagic metabolism of the Douro estuary (Portugal) - Factors controlling primary production. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 69:133-146.
- Azevedo, IC, PM Duarte, AA Bordalo (2008): Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76: 620–633.
- Azevedo, IC, AA Bordalo, PM Duarte (2010): Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal). *Water Research* 44: 3133–3146.
- Bastos, L, A Bio, JL Pinho, H Granja, AJ daSilva. (2012): Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 109: 53–69.
- Becker, JJ, DT Sandwell, WHF Smith, J Braud, B Binder, J Depner, D Fabre, J Factor, S Ingalls, S-H Kim, R Ladner, K Marks, S Nelson, A Pharaoh, R Trimmer, J Von Rosenberg, G Wallace, P Weatherall (2009): Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30\_PLUS. *Marine Geodesy* 32: 355–371.
- deCastro, M, M Gómez-Gesteira, MN Lorenzo, I Álvarez, AJC Crespo (2008): Influence of atmospheric modes on coastal upwelling along the western coast of the Iberian Peninsula, 1985 to 2005. *Climate Research* 36: 169-179.
- Delft3D-Flow (2011): User Manual – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Deltares, Netherlands, 64p.
- Egbert, GD, AF Bennett, MGG Foreman (1994): Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal Geophysical Research* 99: 24821–52.
- Gómez-Gesteira, M, L Gimeno, M deCastro, MN Lorenzo, I Alvarez, R Nieto, JJ Taboada, AJC Crespo, AM Ramos, I Iglesias, JL Gomez-Gesteira, FE Santo, D Barriopedro, IF Trigo (2011): The state of climate in NW Iberia. *Climate Research* 48: 109–144.
- Horritt, MS, PD Bates (2002): Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268: 87–99.
- IH (1995): Campanha Hidromorfológica para o Estudo da Barra do Douro, Set/Out 94. Instituto Hidrográfico. Report REL TF/OF/02/95, Lisboa.
- Magalhães, CM, AA Bordalo, WJ Wiebe (2002): Temporal and spatial patterns of intertidal sediment-water nutrient and oxygen fluxes in the Douro River estuary, Portugal. *Marine Ecology Progress Series* 233: 55–71.
- Nahon, A, AB Fortunato, X Bertin, AR Pires, A Oliveira, MC Freitas, C Andrade (2011): Numerical modelling of opening and closure of an artificial inlet – Santo André Lagoon, Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 11(3):341-353
- Oliveira, JMP. (1973): O Espaço Urbano do Porto — Condições Naturais e Desenvolvimento. Instituto de Alta Cultura, Centro de Estudos Geográficos, Edições Afrontamento, Coimbra, 496p.
- Pardé, M (1966): Les crues du Douro d'après une étude portugaise remarquable. *Boletim Trimestral de Informação, Direcção Geral dos Serviços Hidráulicos, Lisboa, n.23, 93–169.*
- Pinho, JLS, JMP Vieira, DRCB Neves (2010): Efeito das Obras da Embocadura na Hidrodinâmica, Intrusão Salina e Dinâmica Sedimentar do Estuário do Rio Douro. 10º Congresso da Água. Alvor, 1-13.
- Pinto, J (2007): Influência do regime de escoamento fluvial na hidrologia e dinâmica do estuário do Douro. Relatório final de estágio, Universidade de Évora.
- Portela, LI (2008): Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters* 28: 77–86.
- RCM (2010): Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010. Diário da República, 1.ª série — N.º 64 — 1 de Abril de 2010. Presidência do Conselho de Ministros, Lisboa.
- Rodrigues, R, C Brandão, JP da Costa (2003): As Cheias no Douro Ontem, Hoje e Amanhã. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, Instituto da Água. Report. [http://snirh.pt/snirh/download/Douro\\_hoje.pdf](http://snirh.pt/snirh/download/Douro_hoje.pdf).
- Telemac-2D (2017): User Manual. [http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=user\\_manual\\_telemac-2d](http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=user_manual_telemac-2d).
- Vieira, MEC, AA Bordalo (2000): The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge. *Oceanologica Acta* 23: 585–594.